地球观测保障城市安全：对城市热风险与地面沉降演化的新认知

Constantinos Cartalis¹, 宫辉力^{2,3,4,5}, 高明亮^{2,3,4,5}, Konstantinos Philippopoulos¹, 李小娟^{2,3,4,5}, 朱琳^{2,3,4,5}, Ilias Agathangelidis¹, 陈蓓蓓^{2,3,4,5}, 周超凡^{2,3,4,5}, 郭琳^{2,3,4,5}, Anastasios Polydoros¹

1. National and Kapodistrian University of Athens, Greece

2. 首都师范大学, 中国北京

3. 地面沉降机理与防控教育部重点实验室, 中国北京

4. 水资源安全北京实验室, 中国北京

5. 河北沧州平原区地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站, 中国河北省沧州市

龙计划六期合作研究中, “地球观测在城市安全中的应用: 应对高温风险和地质灾害(95393)”项目主要聚焦于利用地球观测技术来解决城市安全领域的两大不同主题: 城市热风险, 以及与地面沉降相关的地质灾害。

城市热风险方面:

本研究重点探讨了城市热力动态与城市形态、肌理之间的复杂相互作用, 以识别城市热风险科学基础中需考量的关键关联。结果表明, 城市形态和肌理对城市热环境状态具有显著影响, 进而决定了城市热风险水平。此外, 研究构建了一个融合降尺度方法与机器学习的多参数分析框架, 旨在解析对地观测数据的时空维度特征, 量化城市热力动态与城市化进程的关联, 并基于城市类型学建立热风险分类体系。该框架综合利用地表温度(LST)、植被覆盖度、建筑占地比、不透水表面(硬化路面、岩石)比例、透水表面(裸土、植被、水体)比例、距绿地/公园距离等参数, 以及地表温度异常值、归一化植被指数(NDVI)异常值、透水表面/NDVI复合异常值、高温干旱复合事件等衍生指标。研究特别关注城市绿化对热力动态的调节作用评估, 揭示了绿色基础设施在缓解城市热岛效应中的关键作用。

城市地面沉降方面:

针对气候变化和人类活动共同影响下北京和京津冀城市地面沉降复杂演化和机理问题, 综合遥感、物探、水文地质及人工智能多学科交叉, 集成InSAR、GRACE、进场动力学方法、物理信息神经网络等先进技术, 解析自然-人工二元水循环驱动下城市地下水储量的差异化演变规律以及地面沉降的响应过程。

(1) 综合ERA-5在分析数据集、水资源公报和GLDAS水文模型, 获取近二十年来降水、径流、蒸发和地下水开采量等水循环关键要素的时序演化特征。同时, 采用Theil-Sen趋势分

析、小波分析、变分模态分解、时滞相关分析和随机森林方法，分析了 2003 至 2022 年水循环关键要素的时间演变特征；集成变分模态分解，分析了华北平原自然因素（降水）和人为因素（地下水开采）对地下水储量变化的影响及地下水储量季节性和长期趋势变化特征。

（2）综合地下水位动态长期观测网、水文地质和降水等多源数据，构建有物理机制的 PINNs 地下水位模拟模型。在利用多层感知机（MLP）模型模拟地下水位的先验约束下，将地下水动力学方程加入网络损失函数中，对不同损失函数分量的权重进行优化确定，该模型成功应用于模拟岩溶和多孔介质中的地下水位，为探索地下水演化提供了重要基础。

（3）提出一种基于普通状态的近场动力学方法，用于模拟由于地下水过度抽取导致的连续性地面沉降-非连续性裂缝演化过程，量化了典型水文地质环境与裂缝的关系，研究发现随着断层倾角的增加、含水层厚度的增大、水压下降以及地表沉积物刚性的增强，裂隙会变得更宽更深。